

тальної розробки і складання програмних кодів, представляється в вигляді критического огляду розробки. Вони можуть використовуватися для функціонального аналізу, коли система ще не розділена на компоненти програмного і апаратного забезпечення.

Список літератури: 1. *Watson H. and McCabe Thomas J.* Structured testing: A Testing Methodology Using the Cyclomatic Complexity Metric // National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 500-235, August 1996. 2. *ESA PSS-05-10*, Guide to software verification and validation // ESA BSSC, Issue 1 Revision 1, March 1995. 3. *De Vale John Peter* High Performance Robust Computer Systems // (Ph.D. Thesis, 2002), Pittsburgh, Pennsylvania October 2001 <http://www.ece.cmu.edu/Ekoopman/thesis/devale.pdf>. 4. *Arlat Jean et al* Fault injection and dependability evaluation of fault-tolerant systems // IEEE Transactions on Computers. – Vol. 42. – № 8. – August 1993. – PP. 913-923. 5. *Voas Jeffrey and McGraw Gary* Software Fault Injection: Inoculating Programs Against Errors // Ed. John Wiley & Sons, ISBN 0-471-18381-4. 6. *J. C Laprie* Dependability: Basic Concepts and Terminology. Dependable Computing and Fault Tolerance // Vienna, Austria: Springer-Verlag, 1992. 7. Standard Practice For System Safety – MIL-STD-882D US DoD 10 February 2000. 8. Military Standard Software Development And Documentation. MIL-STD-498. U.S. DoD. December 1994.

Поступила в редколлегию 02.04.2007.

УДК 537.528:537.529

В.С.ГЛАДКОВ, канд.техн.наук; ***О.А.ГУЧЕНКО***; ***О.В.ШЕСТЕРІКОВ***;
І.В.ЯКОВЕНКО, докт.фіз.-мат.наук; НТУ «ХПІ»

ПРОПОНОВАНА ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОСТІ РУЙНУВАННЯ БЕТОНУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСУ НАПРУГИ ТА КЛАСУ БЕТОНІВ

Запропоновано інженерну методику розрахунку ефективності руйнування бетону при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону в залежності від параметрів імпульсів та класу бетону, яка побудована на базі урахування електричного пробоя повітряних пор у товщі бетонів.

Engineering procedure for calculation of efficiency of destruction of concrete under the action of voltage pulses of nanosecond range depending on pulse parameters has been proposed. The procedure is based on taking into account electrical breakdown of air pores in depth of concrete.

Метою цієї роботи є викладення розробленої інженерної методики розрахунку ефективності руйнування бетону в залежності від параметрів імпульсу напруги і класу бетонів

На цей час існує не дуже багато інженерних методик розрахунку ефективності електроімпульсного руйнування матеріалів, які за своїми властивостями подібні до бетону. У [1] розроблена інженерна методика розрахунку кі-

нцевих показників електроімпульсної дезінтеграції матеріалів. Вона будується на визначенні функцій відбору, розлому та відсіву спільно з відомими параметрами джерела імпульсів (C,L,R) та властивостями матеріалу, що руйнується, і дозволяє повністю описати процес руйнування гірських порід та штучних матеріалів електроімпульсним способом. Для розв'язання цієї задачі на ЕОМ створено алгоритм розрахунку, який дозволяє у заданий момент часу визначити гранулометричний склад готового продукту та залишку на ситі, тобто дає змогу описати кінетику процесу та кінцеві результати руйнування. Ця методика розрахунку дозволяє визначити питому та загальну продуктивність, енергоємність процесу та оцінити мінімальний рівень питомих витрат енергії, які потрібні для руйнування матеріалу до заданої крупності шматків.

Але в нашому випадку, тобто при руйнуванні бетону, а не його дезінтеграції до заданої крупності матеріалу, не потрібно визначати вплив функцій відбору та відсіву, а враховувати вплив тільки функції розлому. Руйнування бетону чиниться за рахунок імпульсного електричного пробоя, а, як показано у [2,3], імпульсний електричний пробій бетону обумовлений електричним пробоем повітряних пор на межі «бетон-щебінь», «пісок-бетон», «бетон-металева арматура» та і в самому розчині бетону. Було припущено, що динаміка імпульсного електричного розряду в товщі бетону визначає процес руйнування бетону і інженерну методику розрахунку ефективності руйнування бетону в нашому випадку побудовано на інженерній методиці розрахунку процесу імпульсного пробоя повітря при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону за рахунок розвитку перегрівної несталості в плазмі стримерного каналу [4].

Інженерна методика, яка пропонується, побудована на визначенні часу електричного пробоя t_{np} повітряних прошарків у бетоні, який являє собою суму таких часів: часу запалювання імпульсної корони t_k , часу розвитку стримерів t_{cmp} та часу створення перегрівної несталості електронного газу t_n , тобто

$$t_{np} = t_k + t_{cmp} + t_n. \quad (1)$$

1. Розрахунок часу запалювання імпульсної корони

Для розробки методики розрахунку t_k у повітряних прошарках у бетоні найбільш придатний метод еквівалентних зарядів, який дозволяє з достатнім ступенем точності визначати структуру електричного поля в міжелектродному просторі [5,6]. Нашому випадку найбільш відповідає система електродів типу «стержень-площина», розрахунок поля в якій виконується за допомогою системи двох зарядів – заряду на кінці стержня Q_0 та лінійного заряду на осі стержня τ_0 (рис. 1). Ця модель придатна для розрахунку області поля між кінцем стержня та площиною (області розвитку стримерного розряду).

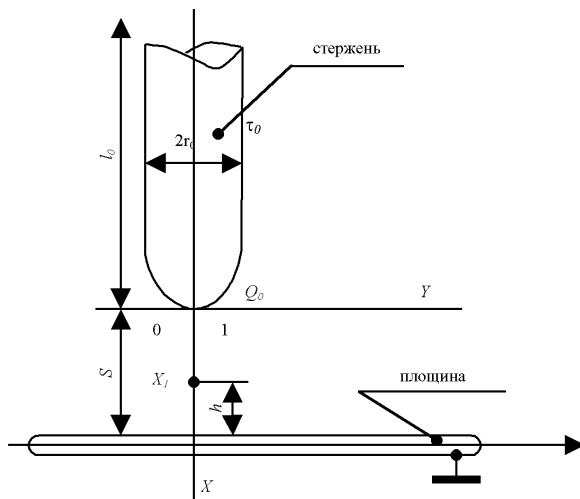


Рисунок 1 – Проміжок «стержень-площина»: l_0 – довжина стержня, r_0 – радіус стержня, S – довжина проміжку, h – відстань від площини до т. X_1 .

Напруженість електричного поля в т. 1 визначається з виразу

$$E_1 = \frac{U}{r_o} \frac{\ell n A_o + 1 + \frac{r_o}{2S}}{\ell n B_o}, \quad (2)$$

$$\text{де } A_o = \frac{(\ell_o + 4S + 4r_o)(\ell_o + 2S + r_o)}{(3\ell_o + 4S + 4r_o)(2S + r_o)r_o}, \quad B_o = \left(\frac{\ell_o}{r_o}\right)^2 \frac{\ell_o + 4S + 4r_o}{3\ell_o + 4S + 4r_o},$$

А розподіл зарядів визначається як

$$\begin{cases} Q^* = U \frac{\ell n A_o}{\ell n B_o}; \\ \tau^* = \frac{U}{\ell n B_o}. \end{cases} \quad (3)$$

Використовуючи експериментальні залежності напруги появи спалаху імпульсної корони від крутості наростання імпульсу напруги [7] та вирази (2) і (3), можна визначити як величину, так і час появи імпульсної корони при різних значеннях r_0 , ℓ_0 , S , які відрізняються від тих, що наведені у [7]. Послідовність розрахунків така:

- визначення по [7] величини запалювання корони $U_{\kappa 1}$ при крутості наростання напруги, яка наведена у [7];
- визначення по (2) напруженості появи корони $E_{\kappa 1}$ для значень крутості та r_0 , ℓ_0 , S , які наведені у [7];
- визначення по (2) та (3) напруги запалювання корони $U_{\kappa 2}$ для різних

- визначень r_0 , ℓ_0 , S та крутості наростання напруги;
- визначення часу запалювання корони t_k по імпульсу напруги наносекундного діапазону, прикладеного до проміжку.

Як приклад, були розраховані напруги та час появи корони t_k в залежності від крутості напруги A для повітряного проміжка з $r_0 = 0,5$ см, $\ell_0 = 100$ см та $S = 20$ см при дії імпульсів напруги з тривалостями фронту та полуспаду імпульсу відповідно 1,5-30 нс та 100-400 нс. Результати розрахунку t_k в залежності від крутості наростання імпульсу напруги наведені на рис. 2.

З розгляду графіка, наведеного на рис. 2, можна зробити висновок, що час запалювання імпульсної корони зі збільшенням крутості наростання імпульсу напруги падає.

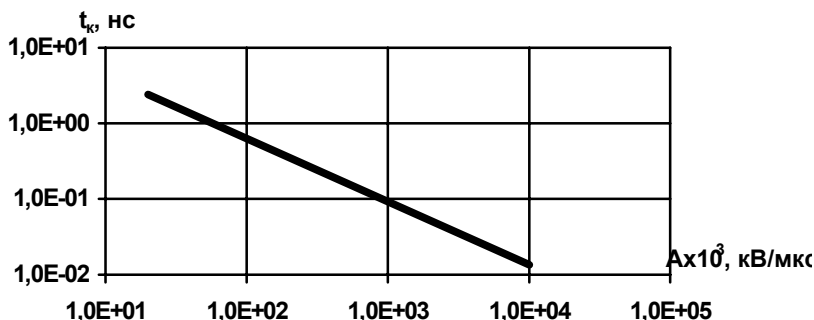


Рисунок 2 – Залежність часу запалення імпульсної корони t_k від крутості наростання імпульсу напруги

2. Розрахунок часу розвитку стримерного каналу

Щоб розрахувати час розвитку стримерного каналу t_{cmp} через розрядний проміжок, скористаємось результатом експериментів, які показали, що швидкість розвитку стримерів v_{cmp} пропорційна крутості імпульсу напруги [8]. Там же наведені залежності v_{cmp} при різних r_0 , ℓ_0 , S . При відомій швидкості v_{cmp} час розвитку стримерів, тобто час, за який стримери перетнуть розрядний проміжок, дорівнює

$$t_{cmp} = \frac{S - d_k}{v_{cmp}}, \quad (4)$$

де d_k – довжина стримера корони.

Довжина стримерів корони залежить від крутості наростання напруги і при невеликій відстані між електродами вони стають порівнянними із самим проміжком. Для визначення довжин стримерів корони використаємо умову виникнення корони

$$\int_0^{x_1} \{\alpha_T [E(x) - a[E(x)]]\} dx = 18...20, \quad (5)$$

де α_T – іонізаційний коефіцієнт Таунсенда,

$E(x)$ – напруженість електричного поля.

Враховуючи, що $x_1 = d_k$, визначимо

$$E(S-h) = \frac{U}{r_o \ln B_o} \left\{ \ln A_o \left[\frac{1}{(S^* - h^* + 1)^2} - \frac{1}{(S^* + h^* + 1)^2} \right] - \right. \\ \left. - \frac{1}{S^* - h^* + 1} + \frac{1}{S^* + h^* + 1} - \frac{1}{S^* - h^* + \ell_o^*} - \frac{1}{S^* + h^* + \ell_o^*} \right\}, \quad (6)$$

$$\text{де } S^* = \frac{S}{r_o}; \quad h^* = \frac{h}{r_o}; \quad \ell_o^* = \frac{\ell_o}{r_o}.$$

Маючи наведену в [7] експериментальну залежність α_T від $E(x)$, відому розрахункову залежність напруги запалювання імпульсної корони від крутості, а також розрахований за (6) розподіл напруженості електричного поля по довжині проміжка, отримаємо розрахункову залежність довжини стримерів корони від крутості наростання A імпульсу напруги (рис. 3).

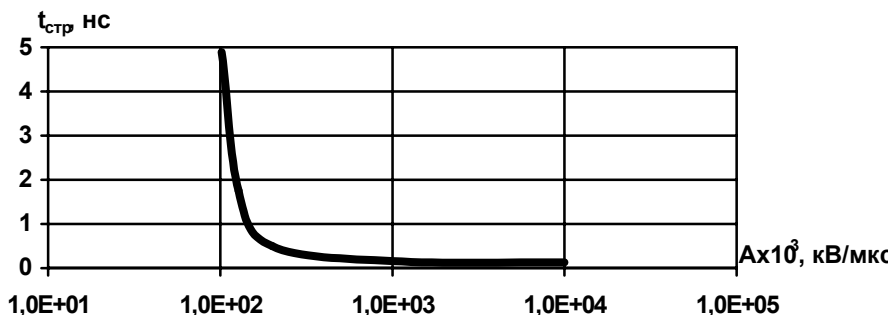


Рисунок 3 – Залежність довжини стримерів корони в повітряних проміжках від крутості наростання імпульсу напруги

При відомій швидкості v_{cmp} [8] були розраховані величини t_{cmp} (рис. 4). З рис. 4 можна зробити висновок, що зі збільшенням крутості наростання імпульсу напруги t_{cmp} падає і асимптотично наближається до 0,2 нс.

3. Визначення часу розвитку перегрівної несталості електронного газу в плазмі стримерів

З [4] відомо, що час за який провідність стримерної плазми σ_{cmp} стане порівнянною з провідністю лідерного каналу σ_l , є часом розвитку перегрівної несталості t_n . Провідність електронного газу стримерного каналу змінюється за законом [4]

$$\sigma = \sigma_{cmp} e^{V_n t}. \quad (7)$$

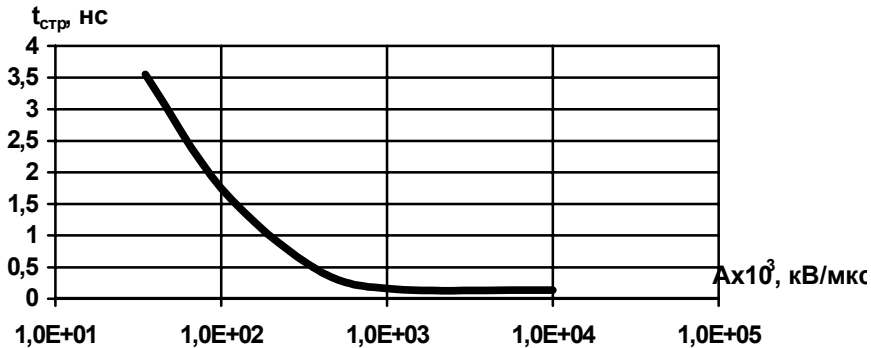


Рисунок 4 – Залежність часу запалення іонізації корони від крутості наростання імпульсу напруги

Прирівнявши (7) величині σ_l і розв'язавши його відносно t_n , отримаємо

$$t_n = \frac{1}{v_n} \ell n \frac{\sigma_l}{\sigma_{cmp}}, \quad (8)$$

де $v_n = \frac{i^3 \sigma_{cmp} E_o^2}{2 N_o \theta} (d - q)$ – інкремент перегрівної несталості [4],

d, q – числа, які характеризують механізм розсіяння енергії та імпульсу,

E_o – напруженість електричного поля,

N_o – концентрація електронів,

θ – ефективна температура.

Розсіяння енергії та імпульсу електронів у стримерній плазмі визначається кулоновським механізмом, тоді відповідно [9]

$$d - q = \frac{1}{2},$$

а величина

$$\theta = \kappa T,$$

де κ – постійна Больцмана, $\kappa = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/°К,

T – температура електронного газу, за якої провідність стримера дорівнює провідності лідера, $T = 3000$ °К [10]. Величина N_o дорівнює $(10^{15} \dots 10^{20})$ 1/м³ [11,12], а величина $\sigma_l = 1 \times 10^4$ 1/Ом [10]. Величина E_o знаходиться з графіку, який наведено у [10], при цьому враховується різна величина E_o для імпульсів позитивної та негативної полярності ($E_o^\theta = 1,8 E_o^\oplus$) [10].

Провідність стримерного каналу дорівнює [10]

$$\sigma_{cmp} = \frac{e^2 n_e}{m v}, \quad (9)$$

де e, m – заряд та маса електронів,

v_m – швидкість дрейфу електронів, яка визначена у [10],

$$n_e = N_{cmp}(A) = \frac{2\pi R_c d_{kz} d_{kx} w_o}{3(\epsilon_o + 1) d_k^2(A) t_k(A) v_o^3}, \quad (10)$$

де v_o – швидкість,

d_{kx}, d_{kz} – розміри зони стримера,

ϵ_o – діелектрична проникність повітря,

w_o – частота.

Підставляючи значення $N_{cmp}(A)$, v_m та ін. у (9), отримано розрахунковим шляхом залежність σ_{cmp} від крутості (рис. 5). З графіків, які наводяться на рис. 5, видно, що провідність стримерного каналу, починаючи з $A \sim 10^6$ кВ/мкс, не змінює свої величини ($10^{-4} \dots 14 \times 10^{-5}$) 1/Ом.

Розрахункові значення t_n для відповідних значень $E_o, N, \theta, \sigma_s, \sigma_{cmp}$ та $S = 0,2$ м наведені на рис. 6.

З аналізу графіка на рис. 6 можна зробити висновок, що при значеннях $A = (40 \dots 80) \times 10^3$ кВ/мкс, t_n різко зменшується до 5 нс.

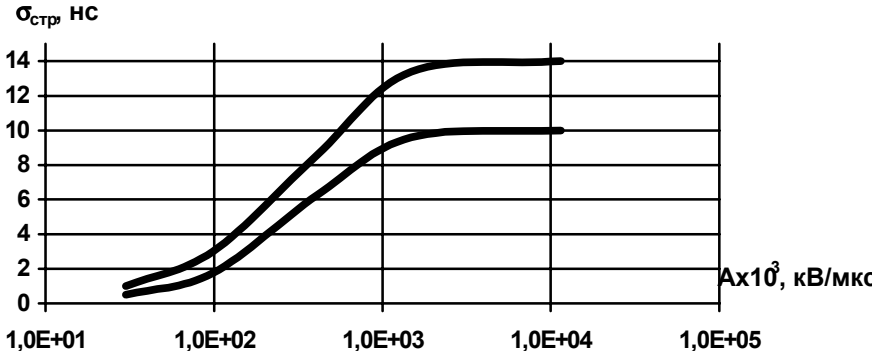


Рисунок 5 – Залежність σ_{cmp} від крутості наростання імпульсу напруги

1 – $\sigma_{cmp} = f(A)$ – для позитивної полярності;

2 – $\sigma_{cmp} = f(A)$ – для негативної полярності.

4. Методика розрахунку ефективності руйнування бетону при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону.

Ефективність руйнування бетону залежить від амплітуди напруги, за якої пробивається бетон, параметрів імпульсу наносекундного діапазону, які залежать від ємності C та індуктивності L джерела імпульсного живлення (ДІЖ), та механічних характеристик бетону (модулю пружності E , межі міцності σ_s та густини ρ). Якщо параметри E , σ_s та ρ є константами для різних марок бетонів, то величина пробивної напруги залежить від багатьох змінних чинників. Тому розробку методики розрахунку ефективності руйнування бетонів треба починати створювати з розробки інженерної методики розрахунку електричної міцності повітряних прошарків у бетонах.

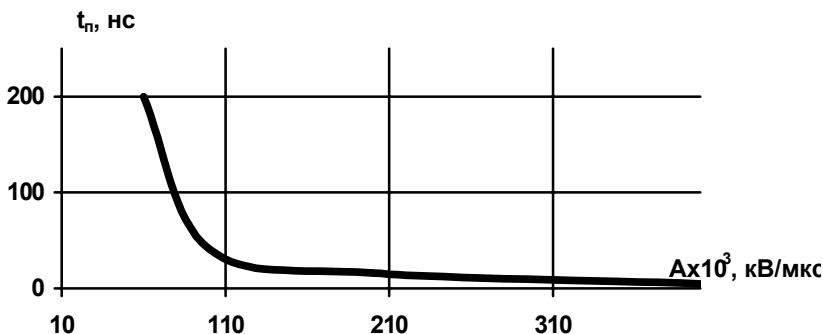


Рисунок 6 – Залежність t_n від крутості наростання імпульсу напруги

Методика розрахунку величини пробивної напруги повітряних прошарків у бетонах при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону побудована в такому порядку:

- для даного проміжка (довжину повітряних прошарків приймаємо рівній товщині бетонних виробів) та крутості наростання імпульсу напруги наносекундного діапазону визначається час пробою t_n як сума часів t_k (рис. 2), $t_{стр}$ (рис. 4) та t_n (рис. 6);
- по імпульсу напруги, який прикладається до бетону, визначається величина напруги, яка відповідає t_{np} ;
- величина напруги, яка відповідає t_{np} , порівнюється з мінімальним значенням напруги $U_{мін}$, яка необхідна для електричного пробою повітряних пор бетону.

Мінімальна напруга $U_{мін}$ визначається за даними роботи [13] за середньою напруженістю в стримерній зоні $E_{стр}$, яка залежить від міжелектродної відстані в момент переходу стримерного каналу в іскровий розряд, тобто

$$U_{мін} = E_{стр} \cdot S. \quad (11)$$

Запропоновано такий порядок розрахунку. Починаючи з моменту $t = 0$, з кроком Δt визначається напруга $U(t)$, яка прикладається до бетону за допомогою електродів. Аналогічні кроки робляться поки не буде досягнуто моменту часу електричного пробою ($t = t_{np}$). Якщо величина напруги, яка прикладена в цей момент до проміжку, менше $U_{мін}$, то процес не завершиться електричним пробоем. А коли $U(t) > U_{мін}$, то процес завершиться пробоем.

Величина пробивної напруги U_{np} при руйнуванні бетону вводиться у вираз для розмірів осколку [1]

$$\bar{a} = \sqrt{3\pi}^{3/2} \frac{r^2 v_{кр} \xi^{1/2} z A}{\rho S U_{np} w^{1/2}}, \quad (12)$$

де r – радіус каналу, см,

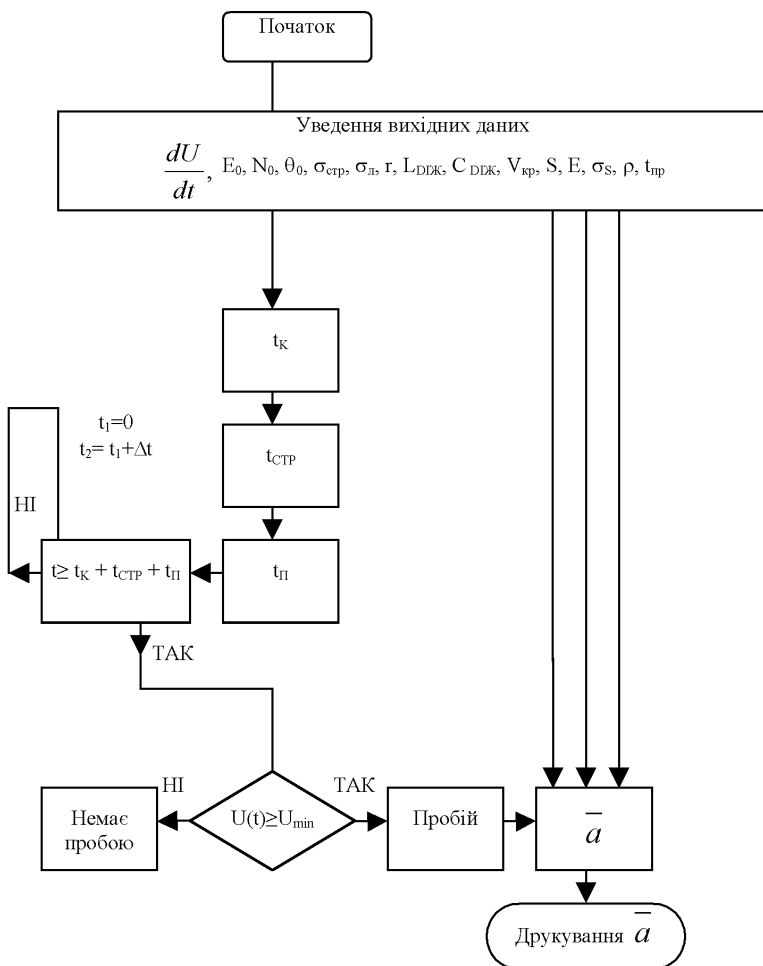


Рисунок 7 – Блок-схема розрахунку руйнування бетону при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону

$$z - \text{хвильовий опір ДІЖ, } z = \sqrt{\frac{L_{\text{ДІЖ}}}{C_{\text{ДІЖ}}}},$$

$L_{\text{ДІЖ}}, C_{\text{ДІЖ}}$ – індуктивність та ємність ДІЖ,

$$A - \text{параметр енергетичної дії, } A = \frac{v_{\text{кр}} r S}{2},$$

S – товщина бетону,

$$v_{кр} - \text{критична швидкість стінки каналу, } v_{кр} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{Q\rho}},$$

σ_s – межа міцності,

Q – модуль пружності,

ρ – густина бетону,

$$\xi = \frac{4r^2 + S^2}{48r^4 + 12r^2S^2 + S^4},$$

$$w - \text{кутова частота, } w = \frac{2\pi}{4t_{фр}},$$

$t_{фр}$ – тривалість фронту $U_{пр}$.

Блок-схему розрахунку руйнування бетонів наведено на рис. 7.

Пропонована інженерна методика розрахунку ефективності руйнування бетонів побудована на урахуванні електричного пробоя повітряних прошарків у товщі бетону при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону, а також фізичних характеристик бетонів та розрядних параметрів джерела імпульсного живлення (L,C).

Список літератури: 1. Кулець В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов // Апатиты, КНЦ РАН, 2002. – 324 с. 2. Танбаев Ж.Г. Импульсная электрическая прочность бетона в дециметровых промежутках // «Изоляция высоковольтных электрофизических установок». – Томск, Изд-во ТГУ, 1988. – С. 55. 3. Куперштох А.П., Stamatelatos C.P., Agoris D.P. Моделирование частичных разрядов в твердых диэлектриках на переменном напряжении // «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах», Тр. XII Межд. симп. – Николаев. – 2005. – С. 59. 4. В.С. Гладков, И.В. Яковенко Про можливий механізм електричного розряду у товщі бетону при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. – № 17. – С. 152-161. 5. Колечицкий Е.С., Филиппов А.А. Расчет электрического поля стержневых электродов // «Электричество». – М.: 1979. – № 7. – С. 59-62. 6. Колечицкий Е.С., Расчет электрических полей устройств высокого напряжения // «Энергоатомиздат». – М.: 1983. – С. 168. 7. Hutzler et D Modelisation de l'amorçage des grands intervalles d'air // EDF. Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, Serie B, Reseaux Electrique, 1982. 8. Базелян Э.М., Горюнов А.Ю. О механизме развития стримеров в резконеоднородном поле // «Электричество». – М.: 1986. – № 11. – С. 27. 9. Денис В., Пожела Ю. Горячие электроны // Вильнюс, Изд. «Минтис», 1971. 10. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: «Наука», 1987. – 592 с. 11. Петер Г. Электронные лавины и пробой в газах. – М.: «Мир», 1968. 12. Takatoshi Shindo and Tochio Suzuki A new calculation method of breakdown voltage-time characteristics of long air gaps // IEEE Trans. On Pow. App and Syst. – Vol. PAS-104. – № 6. – June^ 1985. – P. 1556.

Надійшла до редколегії 05.04.2007.